

RAPORT TECHNICZNO-BADAWCZY: PROJEKT "SEXY-HEXY" – MODUŁOWY SYSTEM BIO-RETENCJI FASADOWEJ Z AUTONOMICZNĄ REGULACJĄ HYDROLOGICZNĄ

1. Wstęp: Paradygmat Nowej Urbanistyki w Obliczu Kryzysu Metabolicznego

1.1. Kontekst Globalny i Uzasadnienie Projektowe

Współczesna cywilizacja stoi w obliczu bezprecedensowego wyzwania, jakim jest redefinicja funkcjonowania ośrodków miejskich. Jak wskazują dane przywołane w dokumentacji konkursowej Best Hacking League ¹, miasta – zajmujące zaledwie 2% powierzchni lądowej Ziemi – stały się głównymi motorami degradacji środowiskowej, odpowiadając za konsumpcję ogromnej większości zasobów i generując aż 70% globalnej emisji gazów cieplarnianych. Ten dysonans poznawczy między przestrzenną "małością" miast a ich gigantycznym "śladem metabolicznym" stanowi punkt wyjścia dla projektu "Sexy-Hexy".

Projekt ten nie jest jedynie próbą estetyzacji przestrzeni miejskiej, lecz technologiczną odpowiedzią na zjawisko "betonozy" i systematycznego zaniku powierzchni biologicznie czynnych.¹ W gęstej tkance miejskiej, gdzie cena gruntu uniemożliwia tworzenie nowych parków, jedyną dostępną niewykorzystaną powierzchnią pozostają płaszczyzny wertykalne – elewacje budynków. Projekt "Sexy-Hexy", opisany w dokumentacji technicznej ¹, proponuje transformację tych pasywnych barier w aktywne biologicznie interfejsy, które pełnią funkcje ekosystemowe: od filtracji powietrza, przez retencję wód opadowych, po izolację termiczną i

akustyczną.

1.2. Cel i Zakres Opracowania

Niniejszy raport stanowi wyczerpujące studium wykonalności, analizę techniczną oraz dokumentację wdrożeniową systemu modułowych heksagonów z mchem. Opracowanie integruje wymagania konkursowe¹ ze szczegółową specyfikacją techniczną rozwiązania.¹ Celem dokumentu jest wykazanie, że proponowany system autonomicznego nawadniania i monitoringu środowiskowego spełnia rygorystyczne kryteria innowacyjności, efektywności ekologicznej oraz skalowalności biznesowej. Analiza obejmuje architekturę systemową, fizjologię zastosowanych organizmów (mchów), inżynierię materiałową biodegradowalnych polimerów oraz zaawansowaną logikę sterowania opartą na mikrokontrolerach i sensorach IoT.

2. Architektura Systemu: Geometria Modułarna i Biomimikra

2.1. Uzasadnienie Geometrii Heksagonalnej

Podstawową jednostką konstrukcyjną systemu jest heksagon (sześciokąt foremny), co znajduje odzwierciedlenie w nazwie projektu "Sexy-Hexy".¹ Wybór tej figury geometrycznej nie jest podyktowany wyłącznie estetyką, lecz wynika z głębokiej analizy inżynierskiej opartej na biomimikrze. W naturze struktury heksagonalne (np. plastry miodu, struktury krystaliczne grafitu, oczy owadów) pojawiają się tam, gdzie konieczne jest maksymalne wykorzystanie przestrzeni przy minimalnym zużyciu materiału budulcowego.

Tabela 1. Analiza porównawcza geometrii modułowych w kontekście systemów fasadowych.

Cecha Geometryczna	Heksagon (System "Sexy-Hexy")	Kwadrat (Systemy Tradycyjne)	Trójkąt	Implikacja dla Projektu
Stosunek Obwodu do Powierzchni	Optimalny (zbliżony do koła)	Średni	Niekorzystny	Mniejsze zużycie materiału PLA na ramki przy maksymalnej powierzchni mchu. ¹
Rozkład Naprężeń	Równomierny (struktura samonośna)	Podatność na ścinanie	Wysoka sztywność, ale niska pakowność	Zwiększona stabilność konstrukcji na wietrze przy montażu na wysokości.
Możliwości Tessalacji	Pełne pokrycie płaszczyzny (3 styki w węźle)	Pełne pokrycie (4 styki w węźle)	Pełne pokrycie (6 styków w węźle)	Możliwość tworzenia organicznych kształtów na elewacji, omijanie okien i gzymsów.
Dystrybucja Mediów (Woda)	Naturalny rozptyw grawitacyjny w 2 kierunkach	Wymuszony przepływ liniowy	Skomplikowane węzły hydrauliczne	Ułatwione grawitacyjne nawadnianie bez użycia pomp. ¹

System heksagonalny pozwala na swobodną rozbudowę klastrów. Każdy moduł jest autonomiczny mechanicznie, ale połączony systemowo. Jak wskazuje dokumentacja ¹, konstrukcja składa się z ramy (frame), w której montowane są czujniki, oraz niezależnego wkładu z mchem (moss insert). Taka separacja funkcji strukturalnej od biologicznej jest kluczowa dla łatwości serwisu – w przypadku degradacji biologicznej wymienia się tylko

wkład, pozostawiając infrastrukturę techniczną nienaruszoną.

2.2. Typologia i Specjalizacja Modułów

System "Sexy-Hexy" odchodzi od koncepcji jednorodnej zielonej ściany na rzecz wyspecjalizowanej "tkanki" technologicznej. Wyróżniono pięć klas modułów, z których każdy pełni odrębną rolę w metabolizmie systemu.¹ Taka dywersyfikacja pozwala na optymalizację kosztów (nie każdy heksagon wymaga drogiej elektroniki) oraz precyzyjne sterowanie warunkami środowiskowymi.

2.2.1. Command Hex (Moduł Dowodzenia)

Jest to jedyny moduł w klastrze wyposażony w jednostkę centralną (mikrokontroler Arduino). Pełni rolę "mózgu" systemu.

- **Funkcja:** Agregacja sygnałów ze wszystkich sensorów, wykonywanie algorytmów decyzyjnych dotyczących nawadniania i bezpieczeństwa, komunikacja zewnętrzna.
- **Wyposażenie:** Arduino, moduł karty SD do logowania danych¹, sterowniki zaworów.
- **Lokalizacja:** Zazwyczaj centralna lub dolna, łatwo dostępna dla serwisu, ale wciąż pokryta mchem dla zachowania ciągłości estetycznej.

2.2.2. Display Hex (Moduł Interfejsu)

Moduł ten służy komunikacji z otoczeniem społecznym. Zgodnie z wytycznymi¹, posiada on niższy profil (jest "płytszy"), aby wyeksponować ekran.

- **Funkcja:** Prezentacja danych w czasie rzeczywistym przechodniom (jakość powietrza, temperatura, stan wody). Realizuje to postulat edukacji ekologicznej.
- **Wyposażenie:** Wyświetlacz (LCD/OLED), układ sterowania obrazem.
- **Lokalizacja:** Na wysokości wzroku człowieka (ok. 1.5 - 1.7 m nad gruntem).

2.2.3. Common Hex (Moduł Standardowy)

Najlichniesza grupa modułów, stanowiąca "mięśnie" i "płuca" systemu. Ich głównym celem jest maksymalizacja powierzchni biologicznie czynnej.

- **Funkcja:** Filtracja powietrza, retencja wody, izolacja.
- **Wyposażenie:** Podstawowe czujniki w wybranych węzłach (wilgotność, temperatura, gazy) połączone magistralą z modułem Command.
- **Struktura:** Zoptymalizowana pod kątem objętości mchu.

2.2.4. Solar Panel Hex (Moduł Energetyczny)

Jednostka odpowiedzialna za autonomię energetyczną. Zamiast wkładu z mchem, posiada panel fotowoltaiczny.

- **Innowacja:** Dokumentacja ¹ wspomina o możliwości obrotu panelu ("rotate to get the optimal sun angle"). Wymaga to zastosowania serwomechanizmów sterowanych przez Arduino, śledzących azymut słońca (solar tracker), co znacząco podnosi efektywność energetyczną w warunkach miejskich, gdzie cienie rzucane przez inne budynki są dynamiczne.
- **Lokalizacja:** Najwyższy rząd instalacji (Top Row).

2.2.5. LED Hex (Moduł Oświetleniowy)

Moduł integrujący funkcję biologiczną z oświetleniem ulicznym.

- **Funkcja:** Doświetlanie chodnika ("provides some light for the street below" ¹), poprawa bezpieczeństwa publicznego oraz estetyczna iluminacja zielonej ściany w nocy.
- **Lokalizacja:** Dolny rząd instalacji (Bottom Row).

3. Inżynieria Biologiczna: Fizjologia Mchu w Środowisku Zurbanizowanym

3.1. Przewaga Bryofitów nad Roślinami Naczyniowymi

Wybór mchu (Bryophyta) jako medium biologicznego w projekcie "Sexy-Hexy" jest strategiczny i wynika z unikalnych cech fizjologicznych tej grupy roślin, które idealnie wpisują się w ograniczenia inżynierskie konstrukcji naściennych. Dokumentacja ¹ słusznie zauważa: "moss doesn't require soil and has good survivability".

1. **Brak Systemu Korzeniowego:** Mchy nie posiadają korzeni w sensie funkcjonalnym (jedynie chwytники - ryzoidy), co eliminuje konieczność stosowania ciężkiej gleby. Tradycyjne zielone ściany wymagają substratów glebowych, które po nasiąknięciu wodą generują ogromne obciążenia statyczne dla elewacji (często przekraczające 100 kg/m²). System "Sexy-Hexy", pozbawiony gleby, jest lekki i może być montowany na starszych budynkach o ograniczonej nośności.
2. **Poikilohydryczność:** Mchy są organizmami, które dostosowują zawartość wody w swoich tkankach do wilgotności otoczenia. W przeciwieństwie do roślin naczyniowych, które więdną i umierają przy braku wody (przerywając słup wody w ksylemie), mchy potrafią przejść w stan anabiozy (uśpienia) podczas suszy i natychmiastowo reaktywować metabolizm po pojawieniu się wody. Ta cecha, określona w ¹ jako "good survivability", drastycznie zwiększa odporność systemu na awarie nawadniania.
3. **Pobieranie Składników Odżywczych:** Mchy absorbują wodę i minerały całą powierzchnią listków (fylidiów) bezpośrednio z powietrza i opadów. Dzięki temu działają jak naturalne "gąbki" filtrujące zanieczyszczenia atmosferyczne.

3.2. Mechanizm Sekwestracji Węgla i Produkcji Tlenu

Projekt podkreśla efektywność mchu w konwersji CO₂ na tlen ("Turn co2 into oxygen moss is very efficient at it" ¹). Badania wykazują, że ze względu na ogromną powierzchnię asymilacyjną w stosunku do zajmowanego miejsca, mchy mogą być wielokrotnie bardziej wydajne w fotosyntezie netto niż trawniki o tej samej powierzchni. W kontekście miejskim, gdzie stężenie CO₂ jest podwyższone, mchy działają w punkcie nasycenia fotosyntetycznego,

maksymalizując produkcję biomasy i tlenu.

3.3. Interakcja z Zanieczyszczeniami (Smog i Pyły)

Mech w systemie "Sexy-Hexy" pełni rolę biofiltra mechanicznego i chemicznego.

- **Filtracja Pyłów (PM2.5/PM10):** Chropowata, naładowana elektrostatycznie powierzchnia mchu skutecznie wychwytuje cząsteczki pyłów zawieszonych. W systemie z automatycznym podlewaniem, pyły te są cyklicznie spłukiwane do zbiornika lub warstwy drenażowej, co regeneruje powierzchnię chłonną rośliny.
- **Wiązanie Metali Ciężkich:** Ściany komórkowe mchów mają wysoką pojemność wymiany kationowej (CEC), co pozwala im na trwałe wiązanie jonów metali ciężkich (ołów, kadm, rtęć) obecnych w spalinach samochodowych, co jest kluczowe w lokalizacjach przyulicznych.

4. Architektura Sprzętowa i Sensoryka (System Nerwowy)

Zgodnie z wymogami BHL ¹, projekt musi wykazywać "zaawansowanie techniczne". System "Sexy-Hexy" realizuje to poprzez gęstą sieć sensorów ¹, które przekształcają pasywną zieleni w inteligentne urządzenie IoT. Poniżej przedstawiono szczegółową analizę zastosowanych komponentów elektronicznych.

4.1. Jednostka Centralna i Komunikacja

Sercem układu jest mikrokontroler z rodziny Arduino (wskazany w ¹ w module "command hex"). Ze względu na liczbę czujników analogowych i cyfrowych, rekomenduje się użycie modelu z rozszerzoną liczbą pinów I/O (np. Arduino Mega) lub zastosowanie multiplekserów. System wyposażony jest w moduł karty SD ¹, który pełni funkcję "Czarnej Skrzynki" (Black Box).

- **Cel Rejestracji Danych:** Zapisywanie parametrów środowiskowych jest niezbędne do udowodnienia "realnego wpływu ekologicznego" przed jury.¹ Dane te, zbierane w trybie

ciągłym (nawet przy braku zasilania sieciowego), pozwalają na wygenerowanie wykresów trendów temperatury i jakości powietrza.

4.2. Sensory Utrzymania Życia (Internal Maintenance Sensors)

Grupa ta odpowiada za autonomię biologiczną systemu.

Tabela 2. Specyfikacja techniczna sensorów podtrzymania życia.

Sensor	Typ	Lokalizacja	Zasada Działania i Uzasadnienie
Soil Moisture Sensor	Pojemnościowy (Capacitive)	Wkład mchu	Pomiar stałej dielektrycznej podłoża. W przeciwieństwie do tanich sond rezystancyjnych, sondy pojemnościowe nie ulegają korozji w kontakcie z wodą, co zapewnia długoterminową stabilność ¹ wymaganą w projekcie. Steruje zaworem nawadniania ("The Thirst Monitor" ¹).
Air Moisture Sensor	Higrometr cyfrowy (np. DHT22)	Zewnętrzna powłoka heksagonu	Mierzy wilgotność względną (RH) powietrza. Służy do predykcji zapotrzebowania na wodę – przy wysokim RH

			ewaporacja z mchu jest niska, system może opóźnić podlewanie, oszczędzając zasoby.
Liquid Level Sensor	Pływakowy / Ultradźwiękowy	Zbiornik wody	Monitoruje poziom rezerw wody deszczowej. Informuje moduł Display Hex o konieczności dolania wody przez serwis, jeśli opady są niewystarczające. ¹

4.3. Sensory Analityczne Środowiska (Ecological Data Sensors)

Sensory te służą kwantyfikacji korzyści płynących z instalacji ("Business Pitch" ¹).

1. **MQ-9 (Detektor Spalin):** Sensor dedykowany do wykrywania tlenku węgla (CO) i gazów łatwopalnych. Jego obecność jest krytyczna dla monitorowania zanieczyszczeń odtransportowych ("Traffic Monitor"). Dane z tego czujnika ("unsafe CO levels at street level 15 times today" ¹) stanowią twardy dowód na potrzebę stosowania barier biologicznych.
2. **MQ-2 (Detektor Ogólny):** Choć w dokumentacji ¹ zaznaczono, że do precyzyjnego pomiaru smogu (PM) lepszy byłby sensor laserowy, MQ-2 pełni rolę "Smog Scout", wykrywając szerokie spektrum gazów (LPG, dym, propan, wodór) jako wskaźnik ogólnego zanieczyszczenia powietrza.
3. **Sound Sensor (Mikrofon z integratorem):** Mech jest doskonałym izolatorem akustycznym. Czujnik ten monitoruje poziom hałasu (dB) w otoczeniu. Porównanie danych z okresów przed i po instalacji (lub w odniesieniu do innej ściany) pozwala wykazać redukcję zanieczyszczenia hałasem ("30% less street noise" ¹), co jest kluczowym argumentem dla budynków mieszkalnych.
4. **Temperature Sensor (Termometria Różnicowa):** Projekt zakłada użycie dwóch czujników – jednego wewnątrz mchu, drugiego na zewnątrz. Różnica wskazań (Delta T) obrazuje skuteczność chłodzenia ewaporacyjnego i izolacji termicznej, walcząc z efektem

miejskiej wyspy ciepła.¹

4.4. System Bezpieczeństwa Przeciwpozarowego (Safety & Emergency)

Innowacyjnym elementem projektu jest aktywny system gaszenia. Mech, jako materia organiczna, po wysuszeniu może stać się łatwopalny.

- **Detekcja:** Zastosowanie czujnika płomienia (Flame Sensor) operującego w paśmie podczerwieni (IR), który reaguje na specyficzne widmo ognia, a nie tylko na dym (jak MQ-2).
- **Reakcja (Fail-Safe Trigger):** W momencie wykrycia sygnatury ognia, mikrokontroler natychmiast otwiera główny elektrozawór zbiornika wody na 100% przepustowości ("dump the whole water reservoir" ¹).
- **Skutek:** Grawitacyjne zalanie całej ściany poniżej zbiornika tworzy kurtynę wodną, gasząc pożar w zarodku i zabezpieczając elewację budynku. Jest to funkcja krytyczna dla bezpieczeństwa pożarowego w gęstej zabudowie.

5. Hydrologia i System Nawadniania

5.1. Zasilanie Grawitacyjne (Gravity-Fed System)

W celu minimalizacji zużycia energii i awaryjności, system "Sexy-Hexy" wykorzystuje siłę grawitacji do dystrybucji wody, eliminując potrzebę stosowania pomp ciśnieniowych ("gravity will pull the water downwards so no pump needed" ¹).

- **Rezerwuuar:** Główny zbiornik wody (Water Storage) oraz zbiornik energii (Energy Storage) zlokalizowane są w górnej części instalacji lub na dachu.
- **Dystrybucja:** Woda przepływa przez system rurek ukrytych w łącznikach (Connectors) pomiędzy heksagonami. Każdy heksagon posiada wewnętrzne kanaliki ("canals in them" ¹), które rozprowadzają wodę do wkładu mchowego.

5.2. Pozyskiwanie Wody (Rainwater Harvesting)

Zgodnie z zasadami gospodarki cyrkularnej, system integruje się z istniejącą infrastrukturą budynku. Rynny dachowe są podłączone do systemu filtracji wstępnej, a następnie zasilają zbiornik "Sexy-Hexy" ("gutters of the building also feed into this system" ¹).

- **Bilans Wodny:** W klimacie umiarkowanym system dąży do samowystarczalności. W okresach suszy system informuje o konieczności uzupełnienia rezerw.

6. Inżynieria Materiałowa i Technologie Wytwarzania

6.1. Biodegradowalne Polimery (PLA)

Konstrukcja ram i wkładów oparta jest na druku 3D z materiału PLA (Polilaktyd).¹ Jest to polimer biodegradowalny, produkowany z surowców odnawialnych (np. mączki kukurydzianej). Wybór ten wspiera ekologiczny wymiar projektu, jednak niesie wyzwania techniczne związane z ekspozycją zewnętrzną (UV, temperatura, wilgoć).

Analiza Trwałości i Modyfikacje:

Dokumentacja 1 stawia pytanie: "need to check if this can survive being outside".

Standardowe PLA degradowe pod wpływem promieniowania UV i może odkształcać się w temperaturach powyżej 55°C (zeszklenie).

- **Rekomendacja Raportu:** W celu zapewnienia trwałości wymaganej w budownictwie, należy zastosować:
 1. **PLA HT (High Temperature):** Odmiana krystalizowana, odporna na wyższe temperatury.
 2. **Powłoki Ochronne:** Lakierowanie elementów filtrami UV lub zastosowanie domieszek stabilizujących w samym filamencie.
 3. **Alternatywa:** W finalnym produkcie masowym rozważenie kompozytów z włókien naturalnych (np. konopie z biopolimerem) dla zwiększenia sztywności i trwałości.

6.2. System Łączników (Connectors)

Elementy te są kluczowe dla modułowości. Nie tylko łączą heksagony mechanicznie, ale zawierają w sobie kanały hydrauliczne ("tubes for distributing water" ¹). Muszą być wykonane z wysoką precyzją (uszczelnienia), aby zapobiec wyciekowi wody na elewację. Druk 3D pozwala na wytwarzanie skomplikowanych geometrii wewnętrznych kanałów, niemożliwych do uzyskania tradycyjnymi metodami wtrysku bez drogich form.

7. Analiza Wpływu i Model Biznesowy

7.1. Kwantyfikacja Korzyści (Metrics & ROI)

Projekt dostarcza wymiernych danych, co jest kluczowe dla oceny BHL (40 pkt za wpływ ekologiczny).

- **Redukcja Hałasu:** Pomiary w dB przed i po instalacji.
- **Jakość Powietrza:** Statystyka incydentów wysokiego stężenia CO i gazów.
- **Efekt Termiczny:** Różnica temperatur elewacji. Zmniejszenie temperatury ściany o 1°C może przynieść znaczące oszczędności w kosztach klimatyzacji (szacunkowo 5-10% energii).

7.2. Aspekty Społeczne i Psychologiczne

Raport podkreśla rolę "zielonej psychologii" ("green = happy bc science" ¹). Obecność żywej zieleni w przestrzeni miejskiej redukuje stres (teoria biofilii E.O. Wilsona), co przekłada się na wartość nieruchomości. Moduł Display Hex wzmacnia ten efekt poprzez interakcję i edukację, budując świadomość ekologiczną mieszkańców.

8. Podsumowanie i Wnioski Końcowe

Projekt "Sexy-Hexy" to kompleksowe, interdyscyplinarne rozwiązanie problemów współczesnej urbanistyki. Łącząc zaawansowaną inżynierię (IoT, systemy autonomiczne, druk 3D) z naturą (fizjologia mchów), oferuje system, który jest:

1. **Skalowalny:** Dzięki modułowej budowie heksagonalnej.
2. **Autonomiczny:** Dzięki zasilaniu solarnemu i grawitacyjnemu nawadnianiu.
3. **Inteligentny:** Dzięki zaawansowanej analityce danych i systemom bezpieczeństwa przeciwpożarowego.
4. **Ekologiczny:** Poprzez użycie biodegradowalnych materiałów i realną poprawę mikroklimatu.

System ten w pełni realizuje założenia konkursu Best Hacking League, oferując nie tylko prototyp, ale kompletną wizję technologiczną dla miast przyszłości, gotową do dalszego rozwoju i komercjalizacji.

Koniec raportu.

Cytowane prace

1. 11.BHL ZADANIE HARDWARE.pdf